

# Радиооптика

Сетевое научное издание  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

<http://radiooptics.ru>

Ссылка на статью:

// Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
Электрон. журн. 2016. № 04. С. 14–24.

DOI: **10.7463/rdopt.0416.0846191**

Представлена в редакцию: 02.06.2016

Исправлена: 16.06.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 551.501

## Оценка лидарных контрастов "нефтяное загрязнение – чистая водная поверхность" в УФ, видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах

Городничев В. А.<sup>1</sup>, Белов М. Л.<sup>1,\*</sup>,

[\\*belov@bmstu.ru](mailto:belov@bmstu.ru)

Всякова Ю. И.<sup>1</sup>, Михайловская М. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

Статья посвящена исследованию лазерного метода контроля нефтяных загрязнений на водной поверхности, основанного на регистрации отраженного от водной поверхности лазерного сигнала. Этот метод позволяет проводить зондирование при больших высотах полета авиационного носителя, что обеспечивает широкое поле обзора на водной поверхности. Проведена оценка лидарных контрастов «нефтяное загрязнение - чистая водная поверхность» в ультрафиолетовом, видимом, ближнем и среднем инфракрасном спектральных диапазонах для длин волн зондирования 0.355, 0.532, 1.06, 1.54, 10.6 мкм. Показано, что наиболее перспективной является безопасная для глаз длина волны зондирования 0.355 мкм ультрафиолетового спектрального диапазона.

**Ключевые слова:** лазер, нефтяные загрязнения, дистанционный метод, обнаружение

---

### Введение

Нефть и продукты ее переработки являются одними из основных загрязнителей поверхности морских и озерных акваторий [1-5]. Проблема загрязнений особенно актуальна для зон шельфа, на которых ведется добыча нефти [6].

Наиболее надежными и перспективными оперативными методами обнаружения разливов нефти и нефтепродуктов на водной поверхности являются дистанционные лазерные методы, основанные на импульсном зондировании и регистрации отраженного от водной поверхности лазерного сигнала или регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения водной поверхности [7-12].

Дистанционные лазерные методы могут использоваться независимо от времени суток и обладают высокой пространственной разрешающей способностью (могут обнаруживать нефтяные загрязнения небольшого размера).

Метод обнаружения нефтяных загрязнений, основанный на регистрации отраженного от водной поверхности лазерного сигнала, позволяет проводить зондирование при больших высотах полета авиационного носителя, что обеспечивает (при пространственном сканировании лазерного пучка) широкое поле обзора на водной поверхности.

Физической основой этого метода является контраст яркости излучения, отраженного от чистой водной поверхности и водной поверхности с нефтяным загрязнением. Контраст обусловлен двумя причинами [9]: пленка нефтяного загрязнения имеет другой коэффициент отражения, чем чистая водная поверхность, и нефтяная пленка сглаживает волнение водной поверхности.

Данная статья посвящена разработке оперативного дистанционного лазерного метода обнаружения разливов нефти и нефтепродуктов на водной поверхности, основанного на импульсном зондировании водной поверхности и регистрации отраженного от поверхности лазерного сигнала.

## 1. Постановка задачи

Мониторинг нефтяных загрязнений проводят, регистрируя лазерный сигнал, отраженный от водной поверхности, и определяя контраст между мощностью лазерного сигнала от чистой водной поверхности и водной поверхности с нефтяным загрязнением [9].

Исследование контрастов «нефтяное загрязнение - чистая водная поверхность» между мощностью лазерного сигнала от чистой водной поверхности и водной поверхности с нефтяным загрязнением проводилось в оптическом диапазоне и для некоторых лазерных длин волн в ряде работ (см., например, [8,9,12,13]). Однако, в настоящее время нет ясности какая длина волны является наиболее предпочтительной для лазерного мониторинга нефтяных загрязнений, так как контрасты «чистая водная поверхность – нефтяное загрязнение» очень сильно зависят от длины волны и толщины пленок нефтепродуктов. Кроме того, при выборе длины волны зондирования необходимо учитывать степень опасности для зрения и удобство эксплуатации лазера в бортовой аппаратуре.

В статье в широком спектральном диапазоне (от ультрафиолетового диапазона до среднего инфракрасного диапазона) проводится сравнительный анализ лидарных контрастов "нефтяное загрязнение – чистая водная поверхность" в зависимости от толщины пленки нефтяного загрязнения на водной поверхности.

## 2. Лидарный контраст «нефтяное загрязнение - чистая водная поверхность»

Определим лидарный контраст  $K_{oil}$  «нефтяное загрязнение - чистая водная поверхность», следующим образом:

$$K_{oil} = \frac{P_{oil}}{P_w}$$

где

$P_{oil}$  - мощность принимаемого лидарного сигнала, отраженного от чистой поверхности воды;

$P_w$  - мощность принимаемого лидарного сигнала, отраженного от поверхности воды, покрытой пленкой нефти.

Используя формулу для средней мощности лидарного эхо-сигнала [9], можно получить выражение для контраста  $K_{oil}$  “нефтяное загрязнение - чистая водная поверхность” при вертикальном моностатическом зондировании водной поверхности:

$$K_{oil} = \frac{V_2^2 (\gamma_{1x}^2 \gamma_{1y}^2)^{1/2}}{V_1^2 (\gamma_{2x}^2 \gamma_{2y}^2)^{1/2}} \quad (1)$$

где

$\gamma_{x,y}^2$  - дисперсии наклонов взволнованной водной поверхности;

$V^2$  - коэффициент отражения Френеля для плоского (без волнения) участка водной поверхности при зондировании в надир (вертикально вниз);

Величины  $V, \gamma$  с индексом 1 относятся к чистой (без нефтяного загрязнения) водной поверхности, а с индексом 2 - к водной поверхности с нефтяным загрязнением (нефтяной пленкой). При получении формулы (1) считалось, что и  $\alpha_{s,r}^2 \ll \gamma_{x,y}^2$  ( $2\alpha_{s,r}$  - углы расходимости источника и поля зрения приемной оптической системы), а скорость приводного ветра невелика, так что пена на водной поверхности не образуется.

В формулу (1) входит два сомножителя -  $\frac{V_2^2}{V_1^2}$  (отношение коэффициента отражения  $V_2^2$  нефтяного загрязнения (пленки нефтепродукта) к коэффициенту отражения  $V_1^2$  чистой (без нефтяного загрязнения) водной поверхности) и  $\frac{(\gamma_{1x}^2 \gamma_{1y}^2)^{1/2}}{(\gamma_{2x}^2 \gamma_{2y}^2)^{1/2}}$  (отношение дисперсий наклонов неровной (из-за ветрового волнения) поверхности для чистой и загрязненной нефтепродуктами водной поверхности).

Проведем анализ спектральной зависимости множителя  $\frac{V_2^2}{V_1^2}$ , так как только он зависит от длины волны зондирования.

При зондировании водной поверхности вертикально вниз формула для коэффициента отражения  $V_2^2$  трехслойной системы «воздух - пленка нефтяного загрязнения - вода» имеет вид [12]:

$$V_2^2(\lambda, d) \cong \frac{r_{12}^2 + r_{23}^2 T^2(\lambda) + 2r_{12}r_{23}T(\lambda)\cos[2\beta(\lambda, d)]}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 T^2(\lambda) + 2r_{12}r_{23}T(\lambda)\cos[2\beta(\lambda, d)]}, \quad (2)$$

где

$$T(\lambda) = \exp\left(-\frac{4\pi k_2 d}{\lambda}\right); \quad \beta(\lambda, d) = \frac{2\pi d}{\lambda} n_2;$$

$$r_{23} = \sqrt{\frac{(n_2 - n_3)^2 + (k_2 - k_3)^2}{(n_2 + n_3)^2 + (k_2 + k_3)^2}}; \quad r_{12} = -\sqrt{\frac{(1 - n_2)^2 + k_2^2}{(1 + n_2)^2 + k_2^2}};$$

$n_{2,3}, k_{2,3}$  – показатели преломления и поглощения нефтяного загрязнения и воды;

$\lambda$  – длина волны излучения;

$r_{12}^2, r_{23}^2$  – коэффициенты отражения границ раздела «воздух – нефтяное загрязнение» и «нефтяное загрязнение – вода»;

$T(\lambda)$  – пропускание пленки нефтяного загрязнения.

Индексы 1,2,3 относятся к воздуху, нефтяному загрязнению и воде (показатель преломления воздуха принят равным 1, а показатель поглощения воздуха – 0).

Как видно из формулы (2) величина  $V_2^2$  сложным образом зависит от длины волны излучения  $\lambda$ , толщины пленки  $d$  и характеристик воды и нефтяного загрязнения (это происходит из-за интерференции излучения, отраженного от границ раздела «воздух – пленка нефтяного загрязнения» и «пленка нефтяного загрязнения – вода»).

Коэффициент отражения  $V_1^2$  двухслойной системы «воздух – вода» (для чистой без нефтяного загрязнения водной поверхности) определяется следующей формулой вид (см., например, [13]):

$$V_1^2 = \frac{(1 - n_3)^2 + k_3^2}{(1 + n_3)^2 + k_3^2} \quad (3)$$

Зависимость коэффициента отражения  $V_1^2$  от длины волны излучения  $\lambda$  определяется только спектральной зависимостью показателей преломления и поглощения воды.

В работе в широком спектральном диапазоне (от ультрафиолетового до среднего инфракрасного) проводится оценка лидарного контраста  $K = \frac{V_2^2}{V_1^2}$  – отношения коэффициента отражения пленки нефтяного загрязнения к коэффициенту отражения чистой без нефтяного загрязнения водной поверхности.

### **3. Результаты расчета лидарных контрастов «нефтяное загрязнение - чистая водная поверхность» в разных спектральных диапазонах**

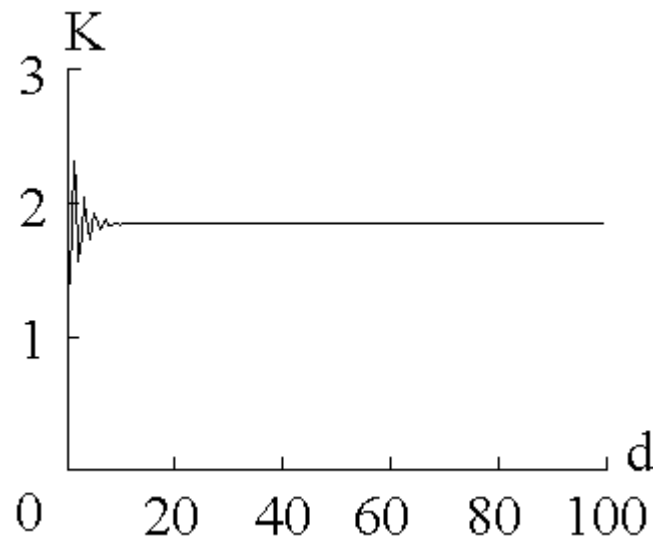
Оценка лидарных контрастов «нефтяное загрязнение - чистая водная поверхность» проводилась в УФ, видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах для длин волн зондирования 0.355, 0.532, 1.06, 1.54, 10.6 мкм.

На рисунках 1 - 5 приведены зависимости лидарного контраста  $K = \frac{V_2^2}{V_1^2}$  (вызванного различием коэффициентов отражения водной поверхности, покрытой пленкой нефтяного

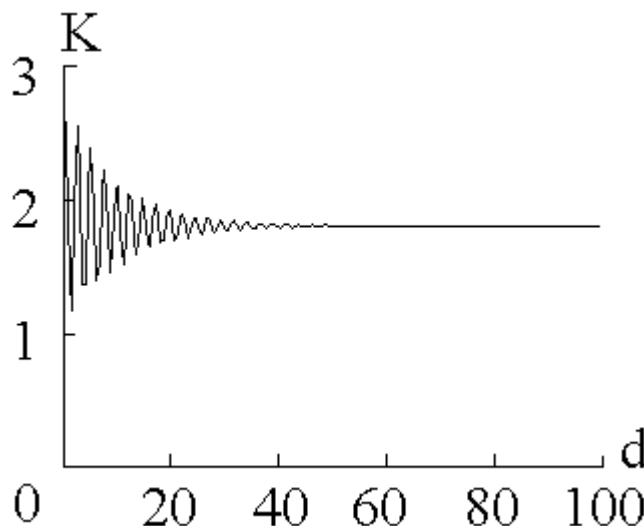
загрязнения, и чистой водной поверхности) от толщины пленки нефтяного загрязнения  $d$  для длин волн зондирования 0.355, 0.532, 1.06, 1.54, 10.6 мкм, соответственно.

Из всех приведенных рисунков видно, что при увеличении толщины пленки нефтяного загрязнения значения лидарных контрастов  $K = \frac{V_2^2}{V_1^2}$  приближаются (колебательно) к некоторым постоянным значениям.

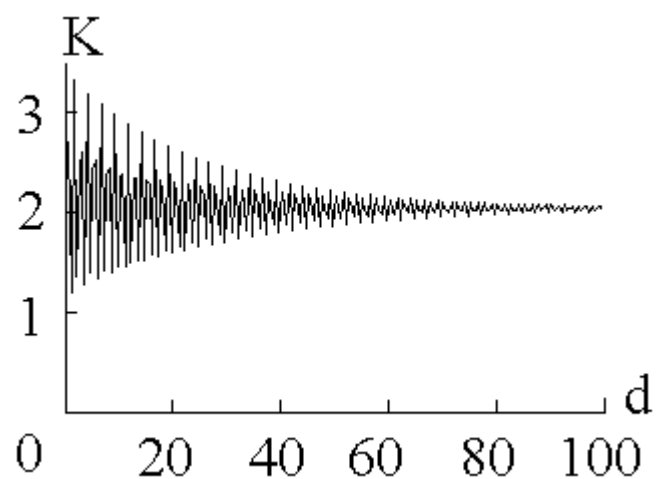
Эти постоянные значения равны лидарным контрастам двухслойной среды «воздух-нефтяное загрязнение» на соответствующих длинах волн зондирования. Для длин волн зондирования 0.355, 0.532, 1.06, 1.54, 10.6 мкм эти лидарные контрасты двухслойной среды «воздух-нефтяное загрязнение» соответственно равны 1.84, 1.8, 2.02, 2.3, 4.6.



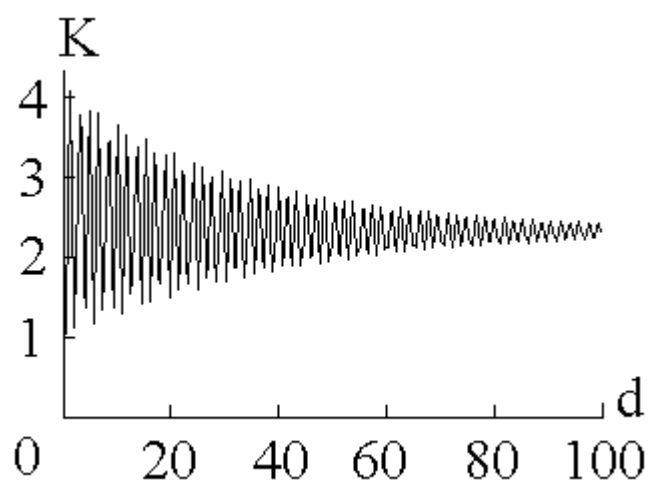
**Рис. 1.** Зависимость лидарного контраста от толщины пленки  $d$  для длины волны 0.355 мкм



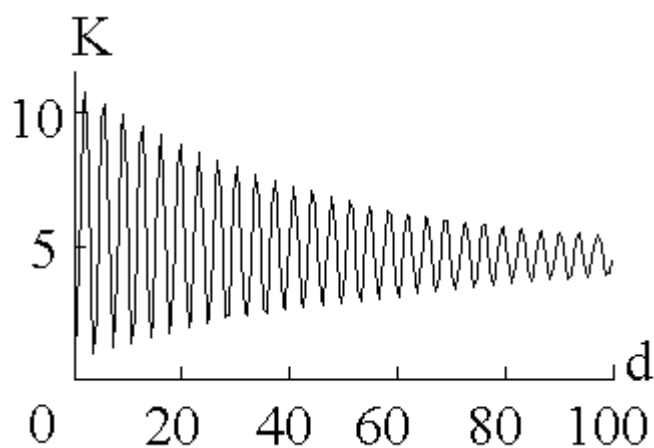
**Рис. 2.** Зависимость лидарного контраста от толщины пленки  $d$  для длины волны 0.532 мкм



**Рис. 3.** Зависимость лидарного контраста от толщины пленки  $d$  для длины волны 1.06 мкм



**Рис. 4.** Зависимость лидарного контраста от толщины пленки  $d$  для длины волны 1.54 мкм



**Рис. 5.** Зависимость лидарного контраста от толщины пленки  $d$  для длины волны 10.6 мкм

Колебательный характер зависимости значения лидарного контраста от толщины пленки нефтяного загрязнения делает работу лазерного обнаружителя нефтяных загрязнений (в реальных условиях шумов измерений) неустойчивой. Поэтому, несмотря на большие значения лидарных контрастов двухслойной среды «воздух-нефтяное загрязнение» в ближнем и особенно в среднем ИК диапазонах, более перспективным (в смысле надежности измерений) является использование видимого и УФ диапазона. При этом, с точки зрения безопасности для глаз предпочтительной является длина волны зондирования 0.355 мкм УФ диапазона (третья гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате, активированном ионами неодима).

## Выводы

Таким образом, проведена оценка лидарных контрастов «нефтяное загрязнение - чистая водная поверхность» в УФ, видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах для длин волн зондирования 0.355, 0.532, 1.06, 1.54, 10.6 мкм. Показано, что наиболее перспективным (в смысле надежности измерений) является использование видимого и УФ диапазона. При этом, с точки зрения безопасности для глаз предпочтительной является длина волны зондирования 0.355 мкм УФ диапазона.

## Список литературы

1. Немировская И.А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Изд-во Научный мир. 2013. 432 с.
2. Загрязнение вод Мирового океана // Сайт учителя географии: веб-сайт. Режим доступа: <http://www.geoman.ucoz.ru/load/0-0-0-42-20> (дата обращения 26.03.2016).
3. Загрязнение морей и океанов // o8ode.ru: веб-сайт. Режим доступа: [http://www.o8ode.ru/article/planetwa/zagraznenie\\_morei\\_i\\_oceanov.htm](http://www.o8ode.ru/article/planetwa/zagraznenie_morei_i_oceanov.htm) (дата обращения 26.03.2016).
4. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в российской федерации за 2013 год. М.: Росгидромет. 2014. 229 с.
5. Нефть и экология // rusnauka.com: веб-сайт. Режим доступа: [http://www.rusnauka.com/17\\_PNR\\_2008/Ecologia/34369.doc.htm](http://www.rusnauka.com/17_PNR_2008/Ecologia/34369.doc.htm) (дата обращения 26.03.2016).
6. Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа. М.: ВНИРО, 2001. 247 с.
7. Measures R.M. Laser remote sensing. Fundamentals and applications. Krieger Publishing Company. Malabar. Florida. 1992. 510 p.
8. Федотов Ю.В., Матросова О.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Метод обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в трех узких спектральных диапазонах // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 3. С.208-212.

9. Березин С.В. Разработка дистанционного лазерного измерителя толщины нефтяных пленок на взволнованной морской поверхности: Дис... канд. техн. наук. М., 2006. 115 с.
10. Козинцев В.И., Орлов В.М., Белов М.Л., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды. М.: Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 528 с.
11. Utkin A., et al. Optical Methods for Water Pollution Monitoring // CIEO. Research centre for spatial and organizational dynamics: веб-сайт. Режим доступа: <http://www.cieo.pt/discussionpapers/8/article10.pdf> (дата обращения 25.07.2016).
12. Матросова О.А. Методы контроля нефтяных загрязнений земной поверхности, основанные на явлении лазерно-индуцированной флуоресценции: Дис... канд. техн. наук. М., 2013. 176 с.
13. Козинцев В.И., Белов М.Л., Городничев В.А., Смирнова О.А., Федотов Ю.В. Лазерный метод измерения толщины пленок нефти на взволнованной морской поверхности, основанный на определении разности набега фаз в пленке для длин волн зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 10. С. 932-935.
14. Козинцев В.И., Городничев В.А., Белов М.Л., Смирнова О.А., Березин С.В., Хрусталева Ю.М. Лазерный метод дистанционного контроля толщины пленки нефтепродуктов на взволнованной морской поверхности // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2005. Т.3, № 4-5. С. 54-59.



## Estimation of Lidar Contrast "Oil Pollution – Clean Water Surface" in UV, Visible, Near and Middle IR Bands

V.A. Gorodnichev<sup>1</sup>, M.L. Belov<sup>1,\*</sup>,

<sup>\*</sup>[belov@bmstu.ru](mailto:belov@bmstu.ru)

Yu.I. Vsyakova<sup>1</sup>, M.B. Mikhailovskay<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** laser, oil pollution, remote sensing method, detection

---

The most reliable and promising operational methods to detect the oil and oil-product spills on the water surface are remote laser methods based on pulsed sounding and recording of the laser signal reflected from the water surface, or recording of the laser-induced fluorescent radiation of the water surface.

Remote laser techniques can be used regardless of the time of day and have a high spatial resolution (can detect oil pollution of small size).

The oil pollution detection method based on recording the laser signal reflected from the water surface allows sounding at high flight altitudes of the aircraft carrier that provides (with a spatial scan of the laser beam) a wide field of view on the water surface.

Monitoring of oil pollution is carried out by recording the laser signal reflected from the water surface, and defining the contrast between the power of the laser signal from the clean water surface and the water surface with oil pollution. However, at present it is unclear what wavelength is the most preferable for laser monitoring of oil pollution, as contrasts "clean water surface - oil pollution" are highly dependent on the wavelength and the thickness of oil films.

Depending on the film thickness of oil pollution on the water surface the paper conducts a comparative analysis of lidar contrasts "oil pollution - clean water surface" in a wide spectral range (from ultraviolet to mid-infrared range).

An estimate of lidar contrasts "oil pollution - clean water surface" was conducted in the UV, visible, near and middle infrared bands for sounding wavelengths of 0.355, 0.532, 1.06, 1.54, 10.6  $\mu\text{m}$ .

It is shown that because of an oscillatory nature of dependence of lidar contrast value on the film thickness of the oil pollution the use of visible and UV range is more promising (in terms of reliability of measurements). Thus, in terms of eye-saving safety the sounding wavelength of 0.3556  $\mu\text{m}$  in UV range is preferable.

## References

1. Nemirovskaya I.A. *Neft' v okeane (zagryaznenie i prirodnye potoki)* [Oil in ocean (pollution and natural tides)]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2013. 432 p. (in Russian)
2. *Zagryaznenie vod Mirovogo okeana* [Global ocean water pollution]. Sayt uchitelya geografii: web-site. Available at: <http://www.geoman.ucoz.ru/load/0-0-0-42-20> (accessed 26.03.2016).
3. *Zagryaznenie morey i okeanov* [Ocean and sea pollution]. o8ode.ru: web-site. Available at: [http://www.o8ode.ru/article/planetwa/zagraznenie\\_morei\\_i\\_okeanov.htm](http://www.o8ode.ru/article/planetwa/zagraznenie_morei_i_okeanov.htm) (accessed 26.03.2016).
4. *Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy v rossiyskoy federatsii za 2013 god* [Environmental conditions and pollution review for Russian Federation in 2013]. Moscow, Rosgidromet Publ., 2014. 229 p. (in Russian)
5. *Neft' i ekologiya* [Oil and ecology]. rusnauka.com: web-site. Available at: [http://www.rusnauka.com/17\\_PNR\\_2008/Ecologia/34369.doc.htm](http://www.rusnauka.com/17_PNR_2008/Ecologia/34369.doc.htm) (accessed 26.03.2016).
6. Patin S.A. *Neft' i ekologiya kontinental'nogo shel'fa* [Continental shelf oil and ecology]. Moscow, VNIRO Publ., 2001. 247 p. (in Russian)
7. Measures R.M. *Laser remote sensing. Fundamentals and applications*. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida. 1992. 510 p.
8. Fedotov Yu.V., Matrosova O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Method of detection of oil pollution on the earth's surface based on fluorescence radiation recording within three narrow spectral bands. *Optika atmosfery i okeana*, 2013, vol. 26, no. 3, pp. 208-212. (in Russian)
9. Berezin S.V. *Razrabotka distantsionnogo lazernogo izmeritelya tolshchiny neftyanykh plenok na vzvolnovannoy morskoy poverkhnosti. Dis. kand. tekhn. nauk* [Developing laser range meter for oil film thickness measurement on wavy sea surface: Ph. D. tech. sci. diss.]. Moscow, 2006. 115 p. (in Russian)
10. Kozintsev V.I., Orlov V.M., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. *Optiko-elektronnye sistemy ekologicheskogo monitoringa prirodnoy sredy* [Optoelectronic systems for environmental ecological monitoring]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002. 528 p. (in Russian)
11. Utkin A., et al. *Optical Methods for Water Pollution Monitoring*. CIEO. Research centre for spatial and organizational dynamics: web-site. Available at: <http://www.cieo.pt/discussionpapers/8/article10.pdf> (accessed 25.07.2016)
12. Matrosova O.A. *Metody kontrolya neftyanykh zagryazneniy zemnoy poverkhnosti, osnovannye na yavlenii lazerno-indutsirovannoy fluorestsentsii: Diss. kand. tekhn. nauk* [Earth surface oil pollution monitoring methods based on laser-induced fluorescence: Ph. D. tech. sci. diss.]. Moscow, 2013. 176 p. (in Russian)

13. Kozintsev V.I., Belov M.L., Gorodnichev V.A., Smirnova O.A., Fedotov Yu.V. Determination of phase incursion difference in a film for sounding wavelengths as a base for a laser method of measurements of oil film thickness on a rough sea surface. *Optika atmosfery i okeana*, 2007, vol. 20, no. 10, pp. 932-935. (in Russian)
14. Kozintsev V.I., Gorodnichev V.A., Belov M.L., Smirnova O.A., Berezin S.V., Khrustaleva Yu.M. Remote laser control technique of oil-product film thickness on wavy sea surface. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information-measuring and Control Systems*, 2005, vol. 3, no. 4-5, pp. 54-59. (in Russian)